

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

**Biosenzor tělesné teploty založený na
Braggovské mřížce**

**Biosensor of Body Temperature Based
on Fiber Bragg Grating**

Zadání bakalářské práce

Student:

Martin Kantor

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Bio senzor tělesné teploty založený na Braggovské mřížce
Biosensor of Body Temperature Based on Fiber Bragg Grating

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Optovláknové senzory teploty nacházejí uplatnění ve stále více oblastech. Typickým příkladem je měření tělesné teploty. Cílem bakalářské práce je popsat principy snímání teploty pomocí optovláknových senzorů a realizace senzoru tělesné teploty založeného na Braggovské mřížce.

- Studium a popis standardních a optovláknových senzorů teploty
- Návrh senzoru tělesné teploty založeného na Braggovské mřížce
- Realizace senzoru tělesné teploty založeného na Braggovské mřížce
- Ověření funkčnosti realizovaného senzoru

Seznam doporučené odborné literatury:

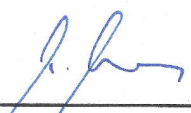
OTHONOS, Andreas, Kyriacos KALLI a Francis T YU. Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing. 2nd ed. Boston, Mass.: Artech House, 1999, xiv, 422 p. Optical science and engineering (Boca Raton, Fla.), 132. ISBN 08-900-6344-3.

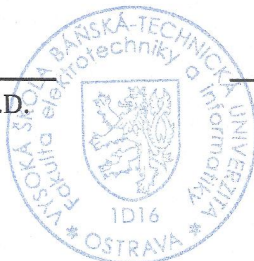
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

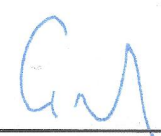
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marcel Fajkus**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární
prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 27. dubna 2017


.....

Rád bych na tomto místě poděkoval Ing. Marcelovi Fajkusovi za cenné rady, vstřícnost při konzultacích, odborné vedení a připomínky při vzniku práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá studiem teplotních senzorů, jejich principy, a následnou tvorbou teplotního optického senzoru založeného na Braggovské mřížce. Jako první jsou popsány dnes nejrozšířenější teplotní senzory a jejich základní rozdělení. Poté je detailněji nastíněna funkčnost optických senzorů založených na Braggovské mřížce. Hlavním cílem této práce je vytvoření optického senzoru speciálně zaměřeného na měření tělesné teploty. V praktické části je provedena jeho analýza, návrhy implementace a vlastní implementace. Nakonec je provedeno zhodnocení dvou vytvořených senzorů a jejich porovnání s konkurenčními nástroji pro měření teploty.

Klíčová slova: teplotní senzor, optické vlákno, Braggovská mřížka

Abstract

This bachelor thesis studies the temperature sensors, their principles, followed by creating temperature optical sensor based on fiber Bragg grating. Firstly the today most widespread temperature sensors and their distribution is described. Furthermore the functionality of optical sensors based on Bragg grating is outlined in more detail. The main goal of this thesis is creation of optical sensor specially aimed at measuring body temperature. In the practical part, there is an analysis, proposals of the implementation and the implementation itself. Finally, the two created optical sensors are reviewed and then compared against the competitor's tools for temperature measurement.

Key Words: temperature sensor, optical fibre, Bragg grating

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	7
Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	9
1 Úvod	10
2 Teplota	11
2.1 Teplotní stupnice	11
2.2 Rozdělení senzorů teploty	12
3 Dotykové senzory teploty	13
3.1 Odporové kovové senzory	13
3.2 Polovodičové odporové senzory	13
3.3 Monolitické PN senzory	16
3.4 Termoelektrické senzory teploty	17
3.5 Dilatační teploměry	18
3.6 Speciální dotykové senzory	19
4 Bezdotykové senzory teploty	21
4.1 Pyrometry	21
4.2 Termografie	22
5 Optovláknové senzory teploty	24
5.1 Optické vlákno	24
5.2 Rozdělení optovláknových senzorů teploty	25
5.3 Bodové senzory teploty	25
5.4 Optovláknové senzory s Braggovskou mřížkou	26
5.5 DTS - Raman OTDR	28
5.6 DSTS - Brillouin OTDR	29
5.7 Senzory s FBG pro vysoké teploty	30
6 Výroba FBG senzoru na měření teploty	32
6.1 Navržení funkčních senzorů	32
6.2 Braggovská mřížka v kovovém pouzdře	32
6.3 Braggovská mřížka v PDMS	33
6.4 Kalibrace senzorů	35
6.5 Ověření přesnosti senzorů	37

6.6	Dlouhodobé měření tělesné teploty	38
6.7	Měření hystereze	40
7	Závěr	43
	Literatura	44

Seznam použitých zkratk a symbolů

BaTiO ₃	–	Titaničitan Barnatý
Co	–	Kobalt
DSTS	–	Distributed Strain and Temperature Sensing
DTS	–	Distributed Temperature Sensing
FBG	–	Fiber Bragg grating
Fe	–	Železo
GaAs	–	Arsenid Gallitý
Ge-OH	–	Hydroxid Germaničitý
IR	–	Infra Red
NTC	–	Negative Temperature Coefficient
OTDR	–	Optical Time-Domain Reflectometry
PDMS	–	Poly Dimethyl Siloxane
PN	–	Polovodiče typu P a N
O	–	Oxid
Pt	–	Platina
PTC	–	Positive Temperature Coefficient
Rh	–	Rhodium
Si	–	Křemík
Si-OH	–	Hydroxid Křemenný
UV	–	Ultra Violet
VVN	–	Velmi Vysoké Napětí

Seznam obrázků

1	Realizace trojného bodu vody	11
2	Typy provedení termistorů	14
3	Typy provedení špiček termočlánků	17
4	Příklad akustického teploměru	20
5	Příklad pyrometru	21
6	Termovizní kamera	22
7	Struktura optického vlákna	24
8	Struktura a vlastnosti Braggovské mřížky	26
9	Optické senzory s Braggovskou mřížkou	28
10	Ramanův rozptyl a spektrum	29
11	Brillouinovo a Ramanovo pásmo po rozptylu	30
12	Závislost Braggovské vlnové délky na teplotě u modifikovaných vláken	31
13	Návrh pro mřížku v kovovém pouzdře	32
14	Senzor v pouzdře ze slitiny mědi	33
15	Návrh senzoru zalitém v PDMS	33
16	Příprava na vytvrzení PDMS	34
17	Teplotní senzor v PDMS a kovové trubici	34
18	Schéma zapojení pro měření kalibrace	35
19	Graf závislosti vlnové délky na teplotě u senzoru s kovovým pouzdrém	35
20	Graf závislosti vlnové délky na teplotě u senzoru v PDMS	36
21	Digitální teploměr CEM DT-316	37
22	Běžný domácí digitální teploměr	38
23	Naměřené hodnoty v podpaží a v lokti	38
24	Naměřené hodnoty na hrudi a břicho	39
25	Naměřené hodnoty v podpaží a v lokti	39
26	Naměřené hodnoty na hrudi a břicho	40
27	Ukázka měření hystereze	40
28	Graf posunutí vlnové délky při hysterezi u senzoru s kovovým pouzdrém	41
29	Graf teploty při hysterezi u senzoru s kovovým pouzdrém	41
30	Graf posunutí vlnové délky při hysterezi u senzoru v PDMS	42
31	Graf teploty při hysterezi u senzoru v PDMS	42

Seznam tabulek

1	Fyzikální vlastnosti použité slitiny mědi $CuSn_{12}Ni_2-B$	32
2	Porovnání naměřených teplot digitálního teploměru a senzoru v kovovém pouzdře	37
3	Porovnání naměřených teplot digitálního teploměru a senzoru v PDMS	37

1 Úvod

V poslední době jsme svědky intenzivního rozvoje výzkumu ve vláknové optice. Na místech, kde kvůli rušivým vlivům není možné použít standardní metody měření, jako např. měření ve snadno vznětlivém prostředí, přichází na řadu optika a použití optovláknových senzorů, na které tyto rušivé vlivy nepůsobí. Studium těchto i standardních teplotních senzorů se zabývá tato bakalářská práce.

V první teoretické části jsou popsány standardní teplotní senzory a jejich principy. Dále jsou charakterizovány optovláknové senzory teploty a jejich funkční principy, které jsou založeny na změně odrazu světla na konci optického vlákna, nebo na změně vlastností šíření světelného paprsku určitým úsekem optického kabelu.

Ve druhé praktické části, na základě zjištěných poznatků o vlastnostech optovláknových senzorů, jsou navrženy a následně realizovány dva funkční tepelné senzory založené na Braggovské mřížce. Při realizaci zapouzdření pro senzory jsou použity materiály, vybrané na základě jejich tepelné vodivosti a také odolnosti, aby se co nejvíce zamezilo deformacím optického vlákna.

V poslední části je zhodnocena funkčnost obou realizovaných teplotních senzorů s Braggovskou mřížkou a jejich porovnání s jinými teplotními senzory.

2 Teplota

Teplota, základní stavová veličina, patří mezi nejdůležitější parametry pro zajištění optimálního technologického procesu. Na teplotě závisí většina vlastností látek, v podstatě je teplota míra kinetické energie atomů a molekul pohybujících se v dané látce. Pokud snížíme teplotu natolik, abychom zastavili pohyb těchto částic, dosáhneme absolutní teplotní nuly, nejnižší teploty.

Určování teploty patří mezi nejrozšířenější měření ve všech různých oborech. Ať už jde o lékařský teploměr v medicíně, zajištění správné teploty při tavení v průmyslu, nebo jen regulaci té správné teploty v našich domech.

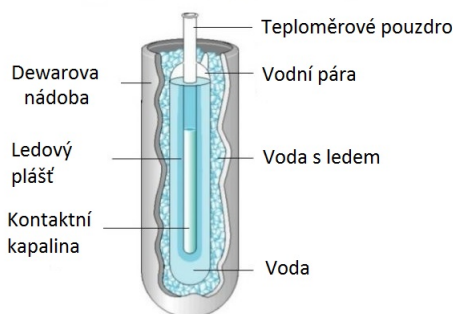
2.1 Teplotní stupnice

Stanovení teploty je závislé na jiných fyzikálních veličinách a jevech, u kterých je možné závislost veličiny matematicky vyjádřit teplotní stupnicí. Jednou z těchto stupnic je termodynamická stupnice, která vychází z účinnosti Carnotova cyklu.

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2}, \quad (1)$$

kde η je účinnost cyklu a T je termodynamická teplota.

Základní jednotkou termodynamické stupnice je kelvin (K). Byl definován určením termodynamické teploty trojného bodu, teploty, při které jsou v rovnovážném stavu všechny tři skupenství vody viz obrázek 1. Tomuto bodu byla pevně stanovena hodnota $T = 273.16\text{K}$.



Obrázek 1: Realizace trojného bodu vody

U nás je nejrozšířenější Celsiova teplotní stupnice, která je odvozena od termodynamické stupnice posunutím o 273,15 K, jednotkou je stupeň Celsia ($^{\circ}\text{C}$) a platí:

$$t(^{\circ}\text{C}) = T - T_0 = T - 273.15\text{K}. \quad (2)$$

2.2 Rozdělení senzorů teploty

Senzor teploty nebo-li snímač teploty je funkční prvek, který je v přímém styku s měřeným prostředím. Existuje řada způsobů jak senzory teploty dělit. Dle fyzikálního principu se dělí na odporové, termoelektrické, polovodičové s PN přechodem, dilatační, optické, radiační, chemické, akustické a další (magnetické, kapacitní a aerodynamické).

Dle styku s měřeným prostředím:

- Senzory pro dotykové měření:
 - elektrické (odporové kovové, odporové polovodičové, polovodičové s PN přechodem, termoelektrické a krystalové),
 - dilatační (kapalinové, plynové, parní a bimetalové),
 - speciální (akustické, šumové, magnetické aj.).
- Senzory pro bezdotykové měření:
 - tepelné,
 - kvantové,
 - akustické (ultrazvukové).

3 Dotykové senzory teploty

3.1 Odporové kovové senzory

Principem odporových kovových čidel je teplotní závislost odporu kovu. Pokud navýšíme teplotu, ve většině případů vzroste i odpor kovového teploměru.

Základní materiálovou konstantou je teplotní součinitel odporu α (K^{-1}), pro který platí:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial t}. \quad (3)$$

Jediným teplotně závislým parametrem u kovů je relaxační čas elektronů $\tau \sim 1/T$, jehož hodnota je řádově $10^{-13}s$.

Pro kovové teploměry použité v rozsahu teplot od $0^\circ C$ až $100^\circ C$ lze použít vztah:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (4)$$

kde R_0 je odpor čidla při teplotě $0^\circ C$. Můžeme tak stanovit střední hodnotu teplotního součinitele odporu α :

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0}, \quad (5)$$

kde R_{100} je odpor čidla při teplotě $100^\circ C$. Pro větší rozsahy teplot platí nelineární rovnice v závislosti na použitém kovu.

Nejrozšířenějšími odporovými kovovými teploměry jsou platinové teploměry, dále se také využívá nikl, měď, molybdén, Balco (Ni-Fe) a pro velmi nízké teploty od $0,5 K$ slitiny Rh-Fe, Pt-Co aj. Výhodami jsou vysoká přesnost u nízkých a středních teplot a možnost dálkového měření. Nevýhodami pak vyšší pořizovací náklady či nutnost externího napájení.

3.2 Polovodičové odporové senzory

Polovodič je pevná látka a jeho elektrická vodivost závisí na vnějších podmínkách a tak polovodičové odporové senzory využívají stejně jako kovové teplotní závislost odporu. Nejdůležitější je závislost koncentrace nosičů náboje na teplotě, pro kterou platí:

$$n = e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (6)$$

kde ΔE je šíře mezery mezi energetickými hladinami a k je Boltzmannova konstanta ($k = 1.380648 \times 10^{-23} J.K^{-1}$).

Pro teplotní součinitel odporu α platí:

$$\alpha \approx \frac{\partial(\ln n)}{\partial T} \approx -\frac{\Delta E}{2kT} \frac{1}{T}, \quad (7)$$

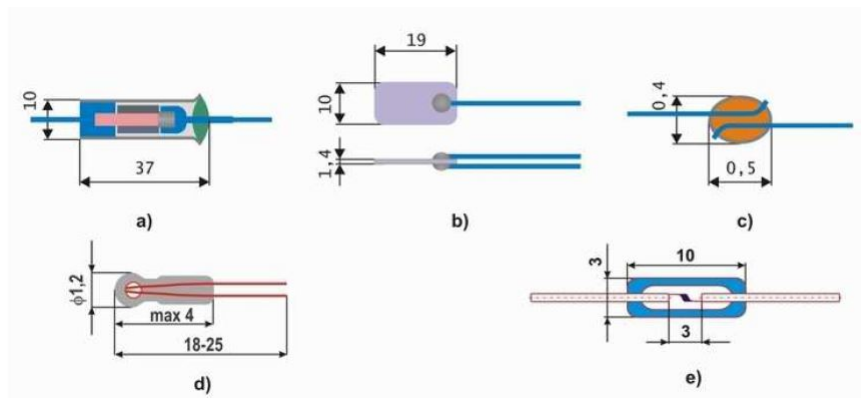
po dosazení koncentrace nosičů náboje n vyplývá, že teplotní součinitel odporu u polovodičových senzorů nabývá záporných hodnot, a liší se o $\Delta E/(2kT)$ od kovových senzorů.

Polovodičové odporové senzory lze následovně rozdělit:

- Termistory
 - Negastory
 - Pozistory
- Monokrystalické odporové senzory

3.2.1 Termistory

Termistory patří mezi nejpoužívanější senzory teploty v elektronice jejichž název vznikl z anglického popisu *thermally sensitive resistor*. Při jejich výrobě se používají polovodičové feroelektrické materiály, díky těmto keramickým materiálům můžeme vyrábět termistory různých tvarů, nejčastěji ve formě tyčinky, destičky nebo perličky viz Obr. 2.



Obrázek 2: Typy provedení termistorů

Výhodami termistorů jsou velká teplotní citlivost, malé rozměry, jednoduchý převod odporu na elektrické napětí nebo proud a možnost měření na větší vzdálenost. Nevýhodou je však nelineární charakteristika. Podle struktury se termistory dělí na amorfnní a polykrytalické a v závislosti na použitém materiálu mají buď záporný nebo kladný teplotní součinitel.

NTC termistory, neboli negastory, mají záporný teplotní součinitel odporu. Vyrábějí se práškovou technologií ze směsi oxidů kovů. Vylisované senzory se zpevňují slinováním za vysokých

teplot. Teplotní rozsahy termistorů se pohybují od běžných - 50 °C do 150 °C až do extrémních rozsahů v oblasti nízkých teplot od 4,2 K a vysokých teplot do 1000 °C.

Závislost odporu NTC termistoru na teplotě je dána přibližným vztahem:

$$R = Ae^{\frac{B}{T}}. \quad (8)$$

Úpravou vztahu pro dvě teploty získáme vhodnější vztah:

$$R_1 = R_r e^{B(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_r})}, \quad (9)$$

kde R_1 je odpor termistoru při teplotě T_1 , R_r je odpor termistoru při referenční teplotě T_r , $B[K]$ je teplotní konstanta daná materiálem negastoru a A je konstanta závislá na geometrickém tvaru.

PTC termistory, neboli pozistory, mají kladný teplotní součinitel odporu. Vyrábějí se z polykrytalické feroelektrické keramiky jako např. titaničitan barnatý (BaTiO_3). Se zvyšující se teplotou odpor pozistoru zpočátku klesá, ale od tzv. Curieovy teploty dochází k prudkému nárůstu rezistivity materiálu. Po tomto nárůstu o několik řádu pak hodnota opět klesá.

Díky této vlastnosti se pozistory často používají jako dvoustavové senzory, kde mohou signalizovat překročení maximální přípustné teploty. Dále se mohou využívat jako omezovače proudu nebo při teplotní regulaci.

3.2.2 Polovodičové monokrystalické senzory

Pro výrobu monokrystalického senzoru můžeme využít řadu materiálů, lze je zhotovit z křemíku, germania, india včetně jejich slitin. V průmyslu se sériově vyrábí monokrystalický senzor z křemíku, tento senzor má rozsah od -50°C do 150°C.

Monokrystalický Si senzor teploty je založen na nevlastním polovodiči typu N, tj. s dominantní elektronovou vodivostí, pro kterou platí vztahy:

$$n \cdot p = n_i^2, \quad (10)$$

$$\sigma = e(\mu_n n + \mu_p p), \quad (11)$$

kde σ je konduktivita, e je elementární náboj, p, n udává koncentraci děr a elektronů, n_i je vlastní koncentrace nosičů nábojů a μ_n, μ_p udávají pohyblivost elektronů a děr.

Teplotní závislost rezistivity křemíku je v uvedeném rozsahu teplot dle dotační koncentrace příměsi dána teplotní závislostí pohyblivosti nosičů. Se zvyšující se teplotou, podobně jako je tomu u kovů, dochází vlivem rozptylu nosičů náboje na mřížce polovodiče ke zmenšování pohyblivosti těchto nosičů a rezistivita dotovaného polovodiče narůstá.

Díky symetrickému uspořádání struktury je odpor senzoru dán dotační koncentrací a geometrií kontaktů a nezávisí na ostatních rozměrech a polaritě kontaktního napětí. Vzhledem k efektu nelineárního přechodového odporu kov – polovodič se doporučuje pracovat s měřícím proudem menším než jeden miliampér.

Teplotní závislost Si senzoru lze aproximovat vztahem:

$$R_t = R_{25} + (1 + \alpha\delta t + \beta\delta t^2), \quad (12)$$

kde $\delta t = t - 25^\circ\text{C}$ a α, β jsou typické hodnoty koeficientů polynomu funkce a R_{25} je odpor při 25°C .

3.3 Monolitické PN senzory

PN senzory teploty jsou založeny na teplotní závislosti napětí PN přechodu v propustném směru. Ze Shockleyovy rovnice:

$$I_D = I_S(e^{\frac{U_D}{mU_T}} - 1), \quad (13)$$

vyplývá vztah:

$$U_D = mU_T \ln\left(\frac{I_D}{I_S} + 1\right), \quad (14)$$

kde U_D je napětí na PN diodě v propustném směru, I_S je saturační proud PN diody v závěrném směru, I_D je proud PN diodou v propustném směru, m je rekombinační koeficient polovodiče $1 \leq m \leq 2$ a U_T je teplotní napětí dané vztahem:

$$U_T = \frac{kT}{e}, \quad (15)$$

kde $k = 1.38 \times 10^{-23}$ je Boltzmannova konstanta, $e = 1,602 \times 10^{-19}$ je elementární náboj a T je teplota v Kelvinech.

Tranzistorové PN senzory jsou založeny na obdobném principu jako PN-diody, využívá se teplotní závislosti přechodu báze-emitor na teplotě v propustném směru. Pro zapojení tzv. tranzistorové diody je rekombinační koeficient $m = 1$ a není závislý ani na proudu I ani na teplotě T .

Integrované PN senzory teploty. Princip vyráběných integrovaných senzorů, u nichž senzor a elektronický obvod tvoří jediný monolitický prvek, vychází ze zapojení. Struktura je napájena ze zdroje napětí U , výstupem je velikost výstupního proudu I .

3.4 Termoelektrické senzory teploty

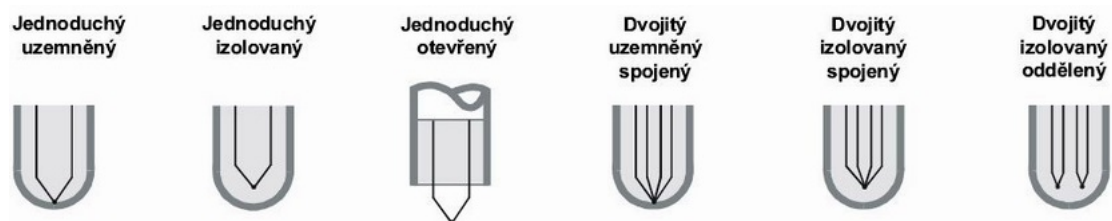
Termoelektrické senzory (termoelektrické články, termočlánky) jsou založeny na Seebeckovu jevu, tj. na jevu převodu tepelné energie na elektrickou. V každém vodiči, jehož teplota není konstantní, vzniká termoelektrické napětí, pro které platí $dU = \sigma(T)dT$. Omezíme naše úvahy na situaci, kdy vodičem neprotéká žádný proud (a nemůže se tedy uplatnit Thompsonův ani Peltierův jev). Napětí $U_{A,B}$ mezi konci vodiče A,B je potom závislé pouze na rozdílu teploty těchto konců a nikoli na průběhu teploty po délce vodiče, přestože vzniká v celé oblasti teplotní změny (to platí, jsou-li vodiče vyrobeny z homogenního materiálu), a platí:

$$U_{B,A} = \int_{T_B}^{T_A} \sigma(T)dT. \quad (16)$$

Toto termoelektrické napětí skutečně existuje, ale není přímo měřitelné. Spojíme-li ale dva dráty z materiálů s rozdílnými Seebeckovými koeficienty σ_1, σ_2 , bude mezi jejich rozpojenými konci B, C napětí:

$$U_{B,C} = U_{B,A} + U_{A,C} = \int_{T_B}^{T_A} \sigma_1(T)dT + \int_{T_A}^{T_C} \sigma_2(T)dT. \quad (17)$$

Jestliže jsme schopni konce B a C držet na shodné známé teplotě T_B (srovnávací nebo referenční teplota), můžeme pak tuto dvojici drátů použít k měření teploty spoje A (měřená teplota) a nazýváme ji termočlánkem.



Obrázek 3: Typy provedení špiček termočlánků

V praxi se setkáváme s velkým množstvím termočlánků, jejich měřicí konec je chráněn měřicí špičkou v několika provedení viz Obr. 3. Typ je třeba volit s ohledem na tvar a rozměr měřeného bodu.

3.5 Dilatační teploměry

Dilatační senzory teploty jsou založeny na změně objemu látek, tedy na jejich teplotní roztažnosti. Měření teploty se tak převádí na měření délky, objemu nebo tlaku.

Dle konstrukce se dělí na:

- tyčové,
- bimetalické (dvojkové),
- kapalinové tlakové,
- parní tlakové,
- plynové tlakové.

Základem funkčnosti tyčových teploměrů je teplotní roztažnost dvou konstrukčních dílů z pevných látek, které jsou v jednom bodě spojeny. Kovová trubice délky L a s velkým teplotním součinitelem délkové roztažnosti α_1 , tvoří čidlo. Uvnitř této trubice je tyč s malým teplotním součinitelem α_2 . Pro rozdíl prodloužení při zahřátí tohoto senzoru pak platí:

$$\Delta L = L(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta t. \quad (18)$$

Tyčové teploměry se v praxi používají v termostatech jako snímače dvoupolohových regulátorů teploty. Jejich výhodou je krátká časová odezva a vysoký teplotní rozsah až do 1000 °C. Nevýhodou je poměrně vyšší nejistota měření.

Bimetalické senzory k měření teploty využívají bimetalový pásek složený ze dvou kovů s různými teplotními součiniteli délkové roztažnosti. Při zahřátí se pásek ohýbá a tento pohyb se přenáší na ručku.

Využití těchto teploměrů je jednak ve funkci akčních členů ve dvoupolohových regulátorech, bimetalických pojistek nebo jako snímačů v teploměrech.

Princip kapalinového tlakového teploměru spočívá v teplotní roztažnosti kapaliny (rtuť, líh). Při zahřátí kapaliny se změní její objem neboť se v důsledku délkové roztažnosti změní všechny rozměry tělesa. Pro malé teplotní rozdíly lze vztah mezi změnou objemu a změnou teploty zapsat ve tvaru:

$$\Delta V = \delta V_0 \Delta t, \quad (19)$$

kde ΔV je velikost objemové změny, δ je součinitel objemové teplotní roztažnosti a Δt udává velikost změny teploty.

Nejznámější skleněný kapalinový teploměr je lékařský teploměr, ve kterém je kapilára nad nádobkou s lihem zúžena, takže při poklesu teploty se lihový sloupec přetrhne a teploměr stále ukazuje nejvyšší naměřenou hodnotu. Výhodou těchto senzorů je jednoduché provedení, nízká cena, přímé čtení údajů. Nevýhodami pak jsou nemožnost měření na větší vzdálenost a náchylnost k mechanickému poškození.

A nakonec v plynových teploměrech se využívá závislost tlaku plynu na teplotě při stálém objemu plynu, nebo závislost objemu plynu na teplotě při stálém tlaku. Obvykle používaným plynem je dusík nebo helium. Při konstantním objemu se tlak plynu mění s teplotou lineárně a platí:

$$p = p_0(1 + \beta t), \quad (20)$$

kde p je tlak, β je součinitel tlakové rozpínivosti a t je Celsiova teplota.

Tyto teploměry se využívají v chemickém průmyslu k dálkovému měření agresivních látek, potravinářském průmyslu díky jejich nulové toxicitě.

3.6 Speciální dotykové senzory

Mezi speciální dotykové teploměry řadíme:

- akustické teploměry,
- krystalové teploměry,
- magnetické teploměry,
- šumové teploměry.

Akustický senzor se zakládá na teplotní závislosti rychlosti šíření zvuku v prostředí. V ideálním plynu pro rychlost šíření w platí:

$$w^2 = \frac{c_p}{c_v} \frac{RT}{M}, \quad (21)$$

kde c_p, c_v jsou měrné tepelné kapacity plynu, R je plynová konstanta a M je molekulová hmotnost plynu.

Akustický teploměr (viz Obr. 4) našel využití při měření velmi nízkých teplot (od 2 K do 20 K) nebo velmi vysokých teplot. V praxi se používá v metrologii. Pro velmi nízké teploty se také často používá magnetický teploměr se svým rozsahem od 10 mK do 20 K až 80 K.



Obrázek 4: Příklad akustického teploměru

Šumové teploměry mají výhodu v nezávislosti na prostředí včetně ionizačního záření či vysoce agresivní atmosféry. Tyto vlivy prostředí se totiž mohou vyloučit přesným změřením odporu nebo poměrovým vyhodnocením. Jejich nevýhodou však je velmi malé výstupní elektrické napětí. Rozsah těchto teplotních senzorů je od 3 K do 1100 K. Jako další ze speciálních principů dotykových senzorů lze zmínit tekuté krystaly a teploměrné barvy.

4 Bezdotykové senzory teploty

Bezkontaktní měření teploty, často označované jako infračervená pyrometrie, se zakládá na vysílání elektromagnetického záření tělesem a přijímaného detektorem o vlnové délce od $0,4 \mu\text{m}$ do $25 \mu\text{m}$. V tomto rozsahu jsou oblasti viditelného spektra, krátkovlnného a středovlnného infračerveného spektra, a dlouhovlnného infračerveného spektra. Elektromagnetické záření v tomto rozsahu se označuje jako tepelné záření. Uvedené rozsahy pokrývají měření teplot v rozsahu od -40°C do $+10\,000^\circ\text{C}$.

Výhody bezdotykových senzorů spočívají v možnosti zanedbaní vlivu měřicí techniky na měřeném objektu, možnost měření pohybujících se objektů, měření z bezpečné vzdálenosti nebo možnost měřit celé povrchy objektů (termovize). Nevýhoda spočívá v nejistotách měření způsobených neznalostí správných hodnot veličin či nepřesnou korekcí záření okolních objektů.

4.1 Pyrometry

Podle oblasti spektra využitého při měření teploty se pyrometry dělí na:

- úhrnné,
- pásmové,
- poměrové.

Úhrnné pyrometry jsou konstrukčně nejjednodušší a nejlevnější, jejich provedení ovlivňuje horní a dolní mez širokopásmového přístroje. Jako úhrnné, celkové a integrační se označují radiační pyrometry. Využívají tepelné záření teoreticky v celém jeho rozsahu, a jsou omezeny pouze absorpční schopností detektoru a propustností optiky pyrometru.



Obrázek 5: Příklad pyrometru

U pásmových pyrometrů je pásmo vlnových délek dáno citlivostí kvantového detektoru záření, spektrální propustností optiky a odrazovostí zrcadel. Měří tedy teplotu prostřednictvím záření v úzkém pásmu vlnových délek. Mezi tyto senzory patří fotonky, fotočlánky, fotodiody aj. Mezi výhody patří rychlá reakce na změnu teploty a často se používají pro měření malých objektů.

Poměrové pyrometry měří teplotu na základě vyhodnocení poměru dvou záření s různými vlnovými délkami. Dříve se označovali jako dvoubarvé pyrometry jelikož tyto dvě délky odpovídali dvěma barvám (červená, zelená).

Poměrové pyrometry se kalibrují při teplotě černého tělesa T_0 (těleso, které dokonale pohlcuje a vyzařuje záření), při které je poměr září pro dvě vlnové délky λ_1 a λ_2 stejný jako poměr září u reálného měřeného tělesa s povrchovou teplotou T_S . Tyto senzory jsou však poměrně složité a využívají se jen pro speciální účely.

4.2 Termografie

Infračervená termografie je obor zabývající se analýzou rozložení teplotního pole na povrchu tělesa. Termografickým měřicím systémem lze zobrazit teplotní pole na povrchu měřeného objektu. Tento obor se v širším měřítku rozvinul společně s rozšířením termokamer (infrachervených kamer), pro které se zažil termín termovize.

Princip termografie spočívá v systému založeném na vakuových fotodiodách, u nichž se tepelný obraz vytvoří optikou na fotokatodě. Ozáření fotokatody způsobí fotoemisi elektronů a jejich zesílený tok je usměrněn na luminiscenční stínítko, kde se vytvoří odpovídající viditelný obraz.



Obrázek 6: Termovizní kamera

Termovize je základním měřicím zařízením pro infračervenou diagnostiku. Na základě přesné znalosti rozložení teplotního pole objektu můžeme lokalizovat materiálové vady, opotřebení třením a další defekty. Termovizní systémy se dělí na systémy s opticko-mechanickým rozkladem obrazu a systémy s maticovým detektorem.

Pokud chceme zjistit defekty uvnitř materiálu, můžeme využít pulzní termografii. Ta je založena na ozařování daného objektu tepelnými pulzy a následným snímáním teploty termovizní kamerou. Po dopadu pulzu se teplo začne šířit materiálem, toto šíření je dané tepelnou difuzí ξ (rozptyl tepelného záření v tělese). Ta závisí na tepelné vodivosti α_{tep} , hustotě ρ a měrné tepelné kapacitě c pro něž platí:

$$\xi = \frac{\alpha_{tep}}{\rho c}. \quad (22)$$

Materiál se zahřeje a po skončení pulzního ozařování se začne zevnitř opět ochlazovat. Nehomogenita se v materiálu projeví časovým rozdílem na tepelném obrazu povrchu objektu.

5 Optovláknové senzory teploty

Většina měřících postupů v průmyslové praxi a výzkumu mohou být provedeny za použití konvenčních elektrických tepelných senzorů, jako třeba termočlánky. Ale tyto konvenční tepelné senzory mají své limity, obzvláště když v prostředí působí velké elektromagnetické vlivy, nebo se má měření provést na velké vzdálenosti. Právě v těchto podmínkách jsou optovláknové senzory schopny ukázat svůj pravý potenciál.

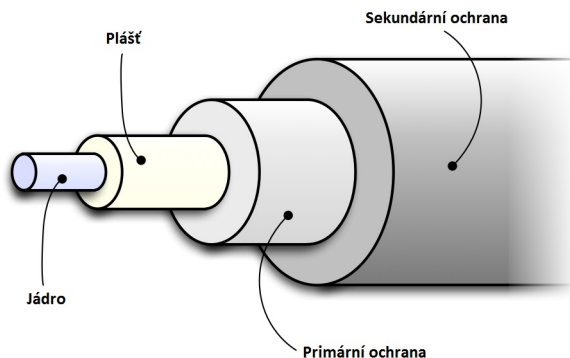
Optovláknové senzory již našly široké uplatnění v monitorování civilních budov, monitorování teploty podél elektrických vysokonapěťových kabelů a transformátorů, nebo úniků produktů, při kterých dochází ke změnám teplotního pole apod. Aplikace v kontrole procesů nebo strojové výroby se za poslední dobu zvýšily, ale stále nabízejí velký potenciál pro růst.

V závislosti na aktuální aplikaci, můžeme využít různé druhy těchto senzorů. Mezi nejběžnější optovláknové teplotní senzory patří:

- Vlákna s Braggovskou mřížkou, kde se využívá teplotní závislosti optického odrazu,
- Vnější interferometrické optické struktury, které vykazují tepelně závislé chování,
- Ramanovy rozptylové teplotní senzory, které využívají teplotní závislosti neelastického rozptylu na optických fotonech,
- Brillounovy rozptylové teplotní senzory, využívající rozptylu na akustických fotonech.

5.1 Optické vlákno

Optické vláknové senzory vznikly působením nežádoucích vlivů prostředí na parametry optických sdělovacích kabelů. Optické vlákno je přenosové medium tvořené skleněným (křemenným) nebo plastovým vláknem, které prostřednictvím světla přenáší signály ve směru své podélné osy.



Obrázek 7: Struktura optického vlákna

Optické vlákno funguje na principu totálního odrazu světla na rozhraní opticky hustšího prostředí (prostředí s vyšším indexem lomu), které tvoří jádro vlákna (core) a opticky řidšího prostředí (s nižším indexem lomu), které tvoří tzv. opticky aktivní plášť vlákna (cladding). Aby došlo k totálnímu odrazu musí být splněna podmínka:

$$\frac{n_p}{n_j} < 1, \quad (23)$$

neboli index lomu jádra musí být větší než index lomu pláště.

Informace, která se přenáší optickým vláknem, se šíří různými vidy, které se šíří po různě dlouhých trajektoriích a tak dochází k deformaci signálu při přenosu vláknem. Tento jev se nazývá intervidová disperze a udává převrácenou hodnotu maximální frekvence, kterou je možné vláknem přenést tak, aby bylo na konci možné rozlišit dva po sobě jdoucí pulsy. Jinými slovy určuje přenosovou kapacitu vlákna.

5.2 Rozdělení optovláknových senzorů teploty

Jak a hlavně podle čeho rozdělit optovláknové senzory je často kladená otázka. Hledisek je celá řada, ale základní rozdělení je na dvě skupiny:

- senzory, kde vlákno slouží jen k přenosu informace,
- senzory, kde vlákno slouží jako detektor.

Důležité je také rozdělení podle prostorového uspořádání:

- Bodové senzory,
- Rozprostřené (distribuované) senzory,
- Polo-rozprostřené (semi-distribuované) senzory.

5.3 Bodové senzory teploty

Bodové senzory teploty jsou kontaktní čidla, která měří teplotu v bodě, ve kterém se dotýkají měřeného objektu. Nemají nic společného s IR čidly, kterými je také opticky snímána teplota. V praxi jsou nejčastěji používány dva principy, které vycházejí z velmi podobného základního uspořádání, kdy systém svítí do vlákna a pak analyzuje světlo, které se po odrazu na sondě vrátí zpět do jednotky.

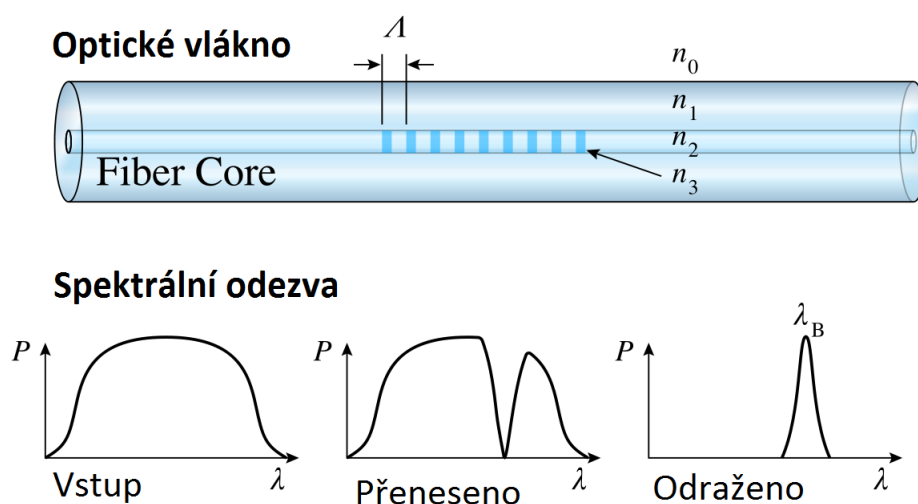
V prvním případě se využívá absorpčních vlastností krystalu GaAs, který je umístěn na konci optického vlákna a který absorbuje část spektra a druhou část spektra propouští. Hrana, která rozděluje tyto dvě oblasti, je závislá na teplotě. Výhodou této metody je nezávislost na intenzitě záření, tedy útlumu vlákna, neboť se měří vlnová délka.

Druhá metoda využívá fluorescence fosforu naneseného na konci vlákna, kterým je přivedeno jak budící záření, tak odvedeno fluorescenční záření zpět do vyhodnocovací jednotky. Rychlost poklesu fluorescence je funkcí teploty, čehož tento princip využívá.

Obě metody využívají vlákno jen k přenosu signálu, jsou využívány průmyslově především pro měření teploty vinutí transformátorů VVN, v oblasti mikrovlnné techniky apod.

5.4 Optovláknové senzory s Braggovskou mřížkou

Zkratka FBG je odvozena od anglického Fibre Bragg Grating a představuje technologii, kdy je do jádra optického vlákna vytvořena struktura podobná difrakční mřížce a to změnami hodnot indexu lomu. Optické vlákna jsou vytvořena s jednotným indexem lomu, ale v Braggovské mřížce se indexy lomu jádra mění s danou periodou Λ jak můžeme vidět na obrázku 8. Pokud do optického vlákna s Braggovskou mřížkou navedeme signál s různými vlnovými délkami, určitá vlnová délka se na mřížce odrazí zpět a ostatní vlnové délky projdou mřížkou neovlivněny. Ze spektrální odezvy na obrázku 8 můžeme pozorovat odraženou Braggovskou vlnovou délku.



Obrázek 8: Struktura a vlastnosti Braggovské mřížky

Toho se docílí rozdělením světla z UV laseru do dvou paprsků, které interferují a vytvoří periodické změny intenzity, které u fotocitlivého materiálu podle intenzity vytvoří již zmíněnou strukturu s rozdílnými hodnotami indexu lomu. Jiný způsob vytvoření FBG mřížky spočívá ve vložení fotomasky do paprsku UV světla. Dnešní technologie umožňují zápis mřížek do jádra vlákna již ve stádiu jeho výroby – tažení. Fotocitlivosti vlákna se docílí dopováním jádra např. oxidy germania.

Délka mřížky se může lišit od desetin milimetru až po stovky milimetrů, s tím pak souvisí i počet maxim a minim, které lze odvodit, pokud známe vlnovou délku, na které budeme mřížku používat. Zpravidla se u senzorů jedná o vlnové délky v pásmu 1510 -1590 nm, ale existují i senzory používané v pásmu 850 nm.

Braggova podmínka je dána rovnicí:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (24)$$

kde λ_B je odražená vlnová délka, n_{eff} je efektivní index lomu a Λ je perioda mřížky.

Pokud nyní podrobíme vlákno změnám teploty nebo mechanickému namáhání, změníme zároveň periodu mřížky a optické vlastnosti, tedy index lomu struktury. To způsobí odraz světla s jinou vlnovou délkou, tento jev závislosti odražené vlnové délky na teplotě a mechanickému namáhání se nazývá křížová citlivost a platí pro ni:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\xi + \alpha)\Delta T + (1 - P_e)\epsilon. \quad (25)$$

První část rovnice udává vliv teploty na Braggovskou mřížku a druhá část vliv mechanického namáhání kde P_e je efektivní foto-elastický koeficient jádra vlákna, který je u křemenných vláken roven 0,22. Po kalibraci senzoru je možné měřit buď teplotu po odečtení vlivu mechanického namáhání, nebo deformaci vlivem mechanického namáhání po odečtení vlivu teploty.

Vliv změny teploty je určen:

$$\frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{d\lambda_B}{dT} = \frac{1}{n_{eff}} \cdot \frac{dn_{eff}}{dT} + \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{d\Lambda}{dT} \quad (26)$$

dále platí, že

$$\frac{1}{n_{eff}} \cdot \frac{dn_{eff}}{dT} = \xi, \quad (27)$$

kde ξ je teplotní-optický koeficient optického vlákna a

$$\frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{d\Lambda}{dT} = \alpha, \quad (28)$$

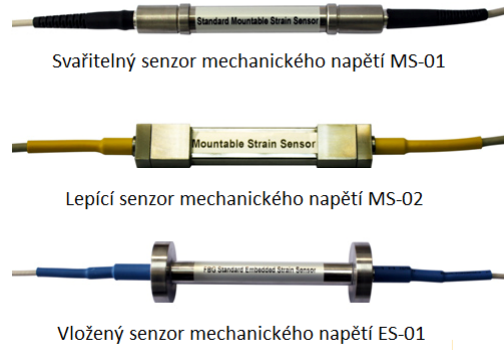
kde α je koeficient teplotní roztažnosti Braggovské mřížky.

Změna střední vlnové délky Braggovské mřížky způsobená teplotou je určena jako:

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = (\xi + \alpha)dT \quad (29)$$

Pro zjednodušení se stanovil teplotní citlivostní koeficient $K_T = \lambda_B(\xi + \alpha)$ a tak se rovnice 29 dá zjednodušit:

$$\Delta\lambda_B = K_T\Delta T \quad (30)$$



Obrázek 9: Optické senzory s Braggovskou mřížkou

Příklady senzorů s Braggovskou mřížkou jsou na Obr 9. Značnou výhodou FBG technologie je možnost na jednom vlákně zapojit do série více senzorů, nebo je zapojit paralelně přes dělič. Můžeme je pak v uvedeném pásmu monitorovat současně. Kolik mřížek je možné sledovat současně na jednom kanále závisí na tom, jak velký měřicí rozsah pro měření potřebujeme. Tento rozsah se promítne do rozmezí vlnových délek, ve kterých se Braggovská vlnová délka senzoru bude pohybovat.

5.5 DTS - Raman OTDR

K rozprostřeným senzorům se řadí distribuovaný senzor teploty, známý pod zkratkou DTS. Tento senzor využívá optické vlákno jako snímač, v tomto případě snímač teploty, který umožňuje jediným měřením získat několik tisíc hodnot teploty a určit tak profil teploty podél optického vlákna. Jako u mnoha dalších optovláknových systémů i zde se vysílá paprsek do optického vlákna a pak se analyzuje světlo, které se vrací zpět do vyhodnocovací jednotky. Měří se chování signálu v bočních pásmech, nikoliv signál na stejné vlnové délce, jakou se do vlákna vysílá. Vzdálenější pásma jsou označována jako Ramanova pásma a srovnávání signálu tzv. Stokesovy a Anti-Stokesovy složky udává informaci o teplotě.

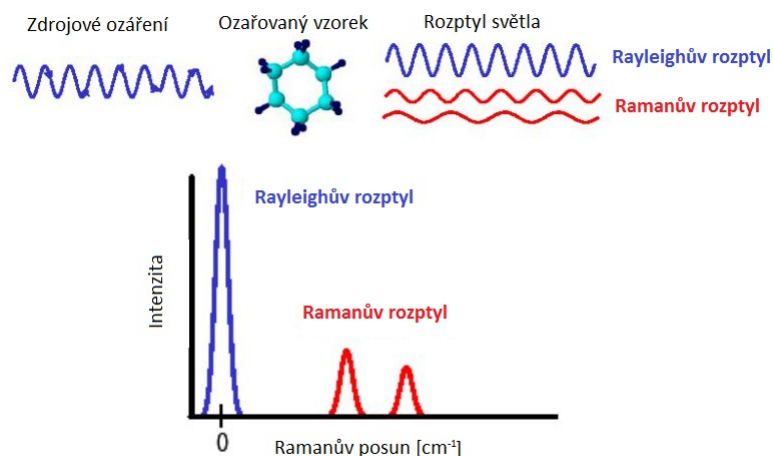
Princip Ramanova rozptylu je zářivý dvou-fotonový přechod mezi dvěma stacionárními vibračními stavy molekuly, jejichž energie jsou E_1 a E_2 , který je vyvolán interakcí s fotonem dopadajícího záření o frekvenci:

$$v_0 > \frac{|E_2 - E_1|}{h}, \quad (31)$$

kde h je Planckova konstanta. Tento přechod je provázený vyzářením fotonu rozptýleného záření o frekvenci v_R . Tento rozptylový efekt si lze zjednodušeně představit jako současnou absorpci fotonu budícího záření molekulou, kdy molekula přechází na virtuální energetickou hladinu, a emisi sekundárního fotonu, za splnění podmínky zachování energie

$$hv_R = hv_0 \pm (E_2 - E_1). \quad (32)$$

Ramanova spektroskopie poskytuje informace o vibračních a rotačních pohybech molekul, které se dají použít při identifikaci látek. Princip spočívá v ozařování vzorku laserem a detekování rozptýleného světla. Většina rozptýleného světla si zachová stejnou frekvenci - Rayleighův rozptyl, ale velmi malá část díky ozáření pozvedne svou energetickou hodnotu a změní frekvenci. Vyhodnocení intenzity těchto posunutých frekvencí oproti zdrojové frekvenci se nazývá Ramanovo spektrum viz Obr 10.

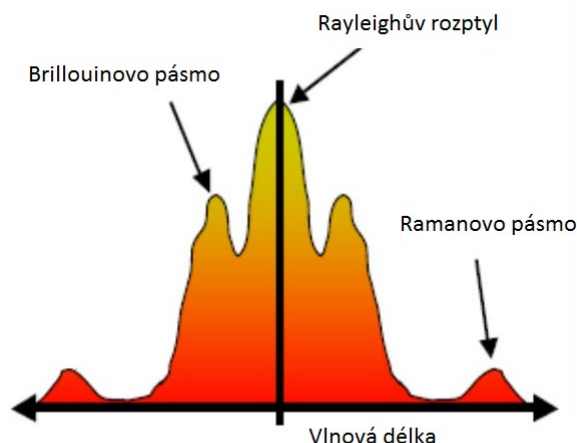


Obrázek 10: Ramanův rozptyl a spektrum

Technologie DTS nachází využití jako lineární požární systém v tunelech, metru a dalších prostorách, v geotechnice, monitoringu kabelů VVN, monitoringu produktovodů, na skládkách uhlí, kde hrozí možnost samovznícení. Systémy jsou konfigurovány podle toho, zda je prioritou rychlá reakce, nebo vysoká přesnost a také podle toho, o jakou vzdálenost se jedná.

5.6 DSTS - Brillouin OTDR

Systémy DSTS jsou schopny kromě teploty snímat také mechanické namáhání vlákna podél jeho podélné osy. K vyhodnocování se používají boční pásma, které jsou blíže k nosné vlnové délce, tzv. Brillouinova pásma viz Obr 11. Brillouinův rozptyl je neelastický rozptyl (mění se vnitřní energie nehomogenity), jedná se o rozptyl na akustických vlnách (fononech) v materiálu. Brillouinova spektroskopie charakterizuje viskoelastické vlastnosti látek.



Obrázek 11: Brillouinovo a Ramanovo pásmo po rozptylu

U systémů DSTS je snímán integrální vliv teploty a namáhání a při snímání pouze jedné z obou veličin se musí najít způsob, jak potlačit nechtěný vliv. Nejčastěji se používá optický kabel, který je schopen jedno vlákno upevnit ke struktuře a přenášet na něj deformace struktury a druhé, které je ponecháno volně, a tak se na něj nepřenáší žádné namáhání a veškeré změny jsou způsobeny pouze teplotou. Tyto změny způsobené teplotou se pak mohou odečíst od změn způsobených na prvním vlákne oběma vlivy a jsou tak získány informace o změnách způsobených pouze namáháním vlákna.

Systémy DSTS jsou využívány především v geotechnice a ve stavebnictví, délka vlákna se pohybuje v rozmezí několika seti metrů až několika kilometrů s rozlišovací schopností 1 m. DSTS technologie však nevyužívá standardní optické kabely, protože je nutné, aby se na vlákno přenášelo mechanické namáhání. Optické kabely obsahují tahové prvky a jsou konstruovány tak, aby se na vlákno žádné mechanické namáhání nepřenášelo. Takže výroba kabelu vhodného pro DSTS technologii je velmi unikátní a způsobuje nárůst útlumu vlákna.

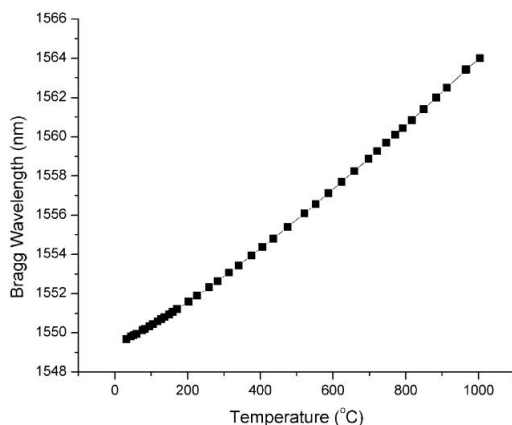
5.7 Senzory s FBG pro vysoké teploty

Optické senzory s Braggovskou mřížkou vykazují špatnou stabilitu v prostředích s extrémně vysokou teplotou. Struktura mřížky může být kompletně porušena při teplotách okolo 700 °C. Z tohoto důvodu se dnes FBG senzory obvykle používají při teplotách pod 200 °C, aby se předešlo narušení mřížky a její schopnosti odrážet určitou vlnovou délku.

Pro měření vysokých teplot za použití FBG musíme modifikovat optické vlákno. Jednou z možností jak toho docílit je použít vlákno které bylo vytvořeno vysokotlakou, nízko-teplotní hydrogenací germaniového optického vlákna. Takto modifikované optické vlákno má teplotní

stabilitu limitovanou Si-OH a Ge-OH vazbami, když však zrušíme tyto vazby během tepleného žíháního procesu, vytvoříme oxidy Si-O-Si a Ge-O-Ge a molekuly vody. Index odrazu je pak tvořen periodickou modulací molekul vody uvnitř optického vlákna. Tyto vlákna s FBG se vyrábí za použití 248 nm UV laseru a teplotních procesních technik[3].

Dosažené spektrální výsledky ukazují, že tyto senzory jsou stabilnější i při vyšších teplotách. Jsou schopny měřit v rozsahu od pokojové teploty až do 1100 °C viz Obr 12.



Obrázek 12: Závislost Braggovské vlnové délky na teplotě u modifikovaných vláken

Díky jejich malé váze, imunitě proti elektromagnetickým vlivům a snadnému použití jsou takto modifikovaná optická vlákna vhodná pro aplikování v mnoha vysoko-teplotních měření.

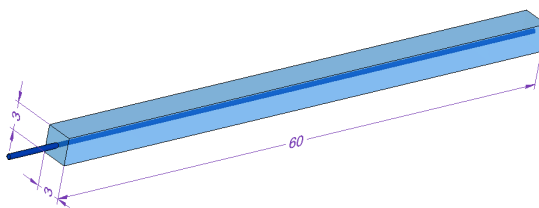
6 Výroba FBG senzoru na měření teploty

6.1 Navržení funkčních senzorů

Před realizováním funkčního senzoru teploty s Braggovskou mřížkou bylo nutné navrhnout jaké materiály použít, s ohledem na jejich teplotní vodivost, a jak omezit vliv deformace na mřížku tak, aby nedocházelo k nepřesnostem při měření teploty. Bylo tedy nutné zabránit např. deformacím při tepu srdce, dýchání a pohybech těla.

6.2 Braggovská mřížka v kovovém pouzdře

Jedna z navržených možností byla zabalit Braggovskou mřížku do kovového pouzdra. Byl zhotoven kovový kvádr viz Obr.13, do kterého byla vyvrtána díra o průměru 2 mm pro zavedení Braggovské mřížky dovnitř. Pro lepší upevnění optického kabelu se následovně provedl krátký 1 cm vrt s větším průměrem 3 mm, který umožnil zapuštění volné sekundární ochrany do pouzdra senzoru a zajistil tak pevnější zafixování pomocí lepidla.



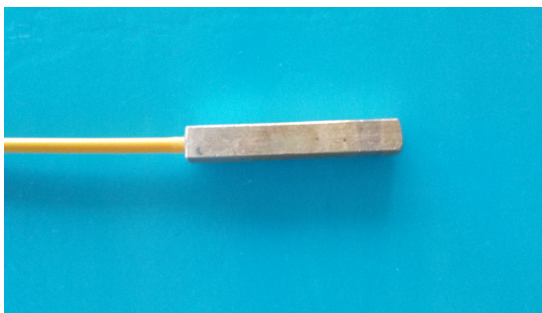
Obrázek 13: Návrh pro mřížku v kovovém pouzdře

Jako materiál byla použita slitina mědi $CuSn_{12}Ni_2-B$, jejíž vlastnosti jsou popsány v tabulce 1.

Hustota $\rho[kg.m^{-3}]$	Měrná tepelná kapacita $c_p[J.kg^{-1}.K^{-1}]$	Tepelná vodivost $\lambda_t[W.m^{-1}.K^{-1}]$	Konduktivita $\lambda_e[MS.m^{-1}]$
8750	375	70	6

Tabulka 1: Fyzikální vlastnosti použité slitiny mědi $CuSn_{12}Ni_2-B$

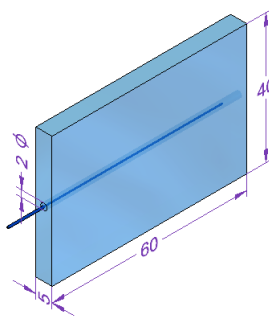
Při realizaci se Braggova mřížka vložila dovnitř ochranného pouzdra, které se vyplnilo teplovodivou pastou. Na konec pouzdra bylo nanášeno lepidlo aby se zabránilo vytržení vlákna z ochranného pouzdra. Výsledný senzor s Braggovskou vlnovou délkou 1548,2 nm je na Obr 14.



Obrázek 14: Senzor v pouzdře ze slitiny mědi

6.3 Braggovská mřížka v PDMS

Druhý návrh senzoru viz Obr 15 byl založen na zalití optického vlákna s Braggovskou mřížkou do elastické látky PDMS, což je elastomer, který zlepšuje teplotní citlivost a je odolný vůči teplotě až stovek °C. Pro potlačení vlivu deformace se vlákno před zalitím vložilo do nerezové kovové trubice.



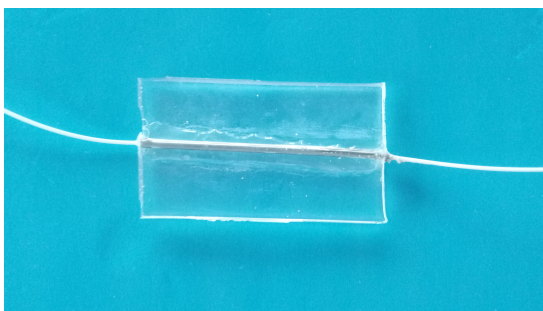
Obrázek 15: Návrh senzoru zalitém v PDMS

Pro požadovaný tvar byla vytvořena forma s požadovanými rozměry. Doprostřed se předem upevnila kovová trubice pro ochranu Braggovské mřížky a následně se forma zalila PDMS. Zalitá forma se vložila do horkovzdušné trouby a při teplotě 90 °C po dobu jedné hodiny se vytvrdila viz Obr 16.



Obrázek 16: Příprava na vytvrzení PDMS

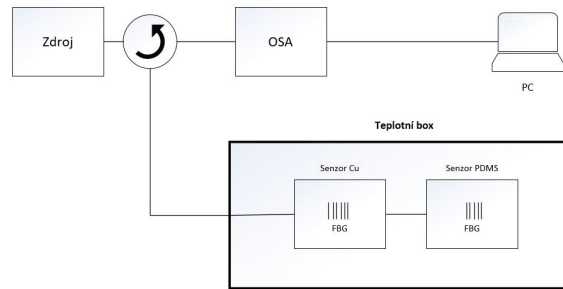
Dovnitř kovové trubice se opět vložila teplovodivá pasta a následně vlákno s Braggovskou mřížkou. Pro zafixování optického vlákna na obou koncích bylo použito lepidlo nanesené na sekundární ochranu optického vlákna a vloženo dovnitř ochranné kovové trubice. Výsledný senzor s Braggovskou vlnovou délkou 1557,1 nm je na Obr 17.



Obrázek 17: Teplotní senzor v PDMS a kovové trubici

6.4 Kalibrace senzorů

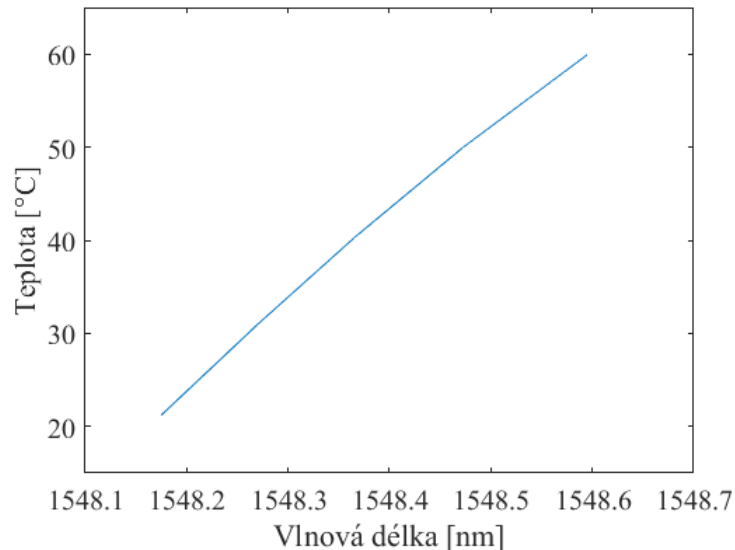
Po realizování obou navržených senzorů bylo zapotřebí provést měření pro jejich kalibraci a na základě naměřených hodnot určit jejich teplotní koeficienty K_T . Sensory připojené k optickému spektrálnímu analyzátoru se umístili do horkovzdušné trouby, ve které se postupně zvyšovala teplota od 20 °C do 60 °C a měřila se příslušná odražená Braggovská vlnová délka. Schéma zapojení pro měření kalibrace můžeme vidět na Obr 18.



Obrázek 18: Schéma zapojení pro měření kalibrace

6.4.1 Kalibrace senzoru v kovovém pouzdře

Výsledky kalibračního měření můžeme vidět na Obr 19. Průměrné teplotní koeficienty holých Braggovských mřížek se pohybují od 5 $pm/^\circ C$ do 10 $pm/^\circ C$ [3]. Po měření byl určen průměrný teplotní koeficient senzoru v kovovém pouzdře na 10,24 $pm/^\circ C$.



Obrázek 19: Graf závislosti vlnové délky na teplotě u senzoru s kovovým pouzdrém

Naměřenými hodnotami byla proložena lineární rovnice přímky ve tvaru:

$$Y = 92.173x - 142677, \quad (33)$$

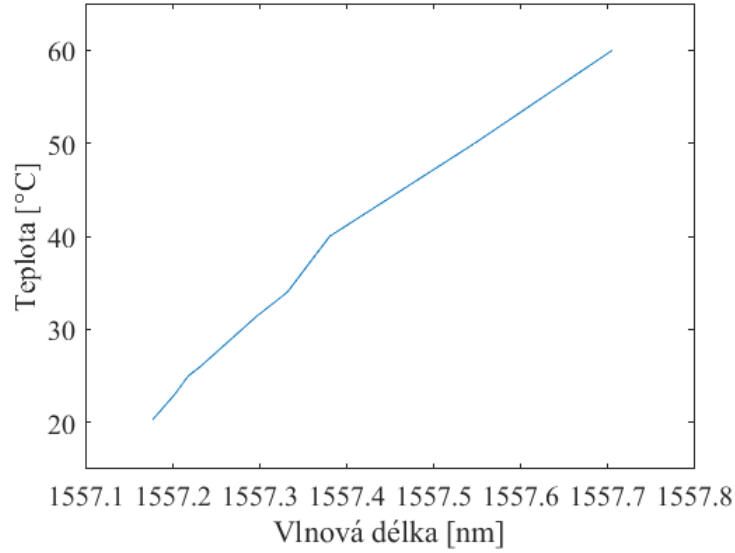
s hodnotou spolehlivosti $R^2 = 0.9977$.

Po kalibraci tedy pro přepočet vlnové délky na teplotu slouží následující rovnice:

$$T = 92.173\lambda_B - 142677. \quad (34)$$

6.4.2 Kalibrace senzoru v PDMS

Výsledky kalibračního měření můžeme vidět na Obr 20. Po měření byl určen teplotní koeficient senzoru v kovovém pouzdře na $13.34pm/^\circ C$.



Obrázek 20: Graf závislosti vlnové délky na teplotě u senzoru v PDMS

Naměřenými hodnotami byla proložena lineární rovnice přímky ve tvaru:

$$Y = 74.717x - 116325, \quad (35)$$

s hodnotou spolehlivosti $R^2 = 0.9901$.

Po kalibraci tedy pro přepočet vlnové délky na teplotu slouží následující rovnice:

$$T = 74.717\lambda_B - 116325. \quad (36)$$

6.5 Ověření přesnosti senzorů

Pro ověření přesnosti realizovaných senzorů bylo provedeno další měření v teplotním boxu, kde se vyhodnotily hodnoty teplot senzorů s Braggovskou mřížkou a porovnaly se s digitálním teploměrem CEM DT-613 viz Obr 21.



Obrázek 21: Digitální teploměr CEM DT-316

Výsledky měření digitálním teploměrem CEM DT-613 a senzorem s Braggovskou mřížkou v kovovém pouzdře je zpracován v tabulce 2.

CEM DT-316	Senzor v kovovém pouzdře	Absolutní chyba
$21.3^{\circ}C$	$21.98^{\circ}C$	$0.68^{\circ}C$
$31^{\circ}C$	$31.12^{\circ}C$	$0.12^{\circ}C$
$40.4^{\circ}C$	$40.98^{\circ}C$	$0.58^{\circ}C$
$50^{\circ}C$	$49.38^{\circ}C$	$0.62^{\circ}C$
$60^{\circ}C$	$60.61^{\circ}C$	$0.61^{\circ}C$

Tabulka 2: Porovnání naměřených teplot digitálního teploměru a senzoru v kovovém pouzdře

Výsledky porovnání se senzorem s Braggovskou mřížkou v PDMS jsou zpracovány v tabulce 3.

CEM DT-316	Senzor v PDMS	Absolutní chyba
$22.3^{\circ}C$	$22.98^{\circ}C$	$0.68^{\circ}C$
$31.5^{\circ}C$	$31.71^{\circ}C$	$0.21^{\circ}C$
$40.4^{\circ}C$	$40.59^{\circ}C$	$0.19^{\circ}C$
$50^{\circ}C$	$50.38^{\circ}C$	$0.38^{\circ}C$
$61^{\circ}C$	$61.72^{\circ}C$	$0.72^{\circ}C$

Tabulka 3: Porovnání naměřených teplot digitálního teploměru a senzoru v PDMS

6.6 Dlouhodobé měření tělesné teploty

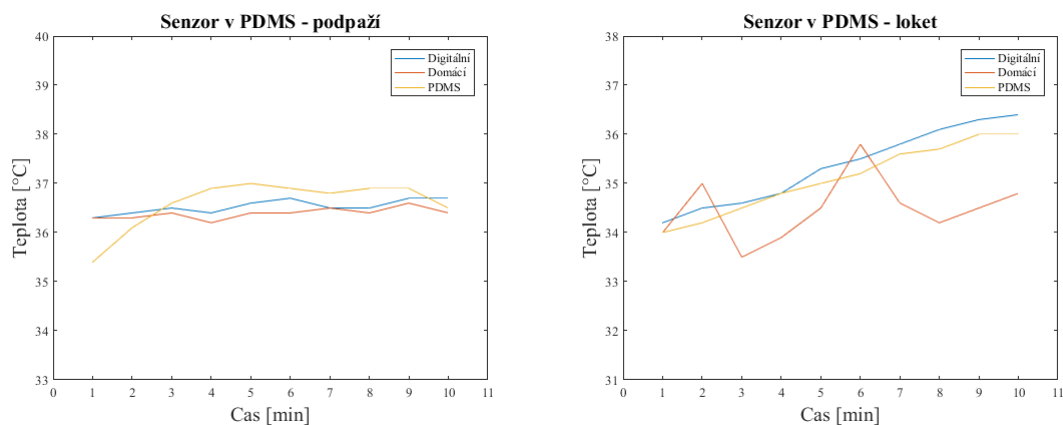
V dalším měření se oba realizované senzory přilepily na různé části těla (hrud', podpaží, břicho, loket) společně s digitálním teploměrem CEM DTS-316. Po dobu 10 minut se zaznamenávala odražená Braggovská vlnová délka a každých 60 vteřin se zaznamenaly naměřené teploty u CEM DTS-316 a navíc i běžným domácím digitálním teploměrem viz Obr22.



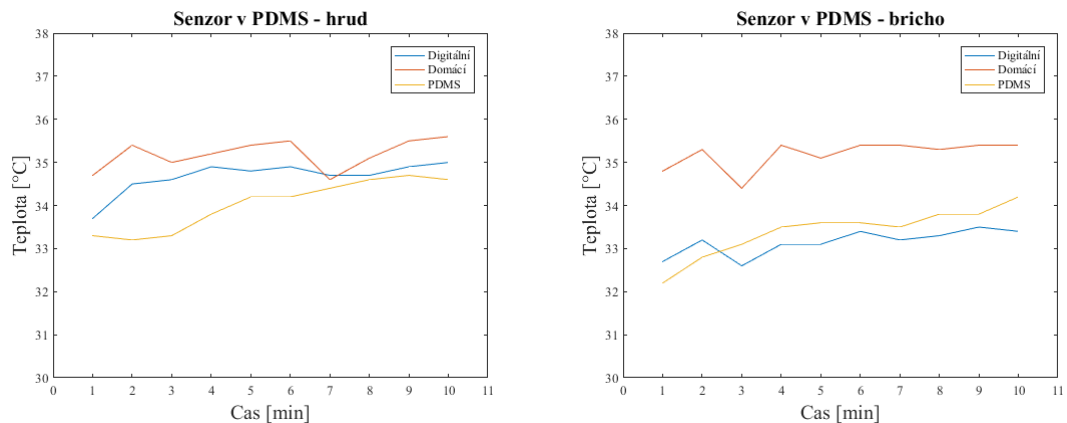
Obrázek 22: Běžný domácí digitální teploměr

6.6.1 Dlouhodobé měření senzorem v PDMS

Na následujících obrázcích jsou vyhodnoceny v grafech teploty těla měřené senzorem zalitým v PDMS. Pro každou část těla (hrud', podpaží, břicho, loket) byl vyhodnocen graf i s hodnotami referenčních teploměrů.



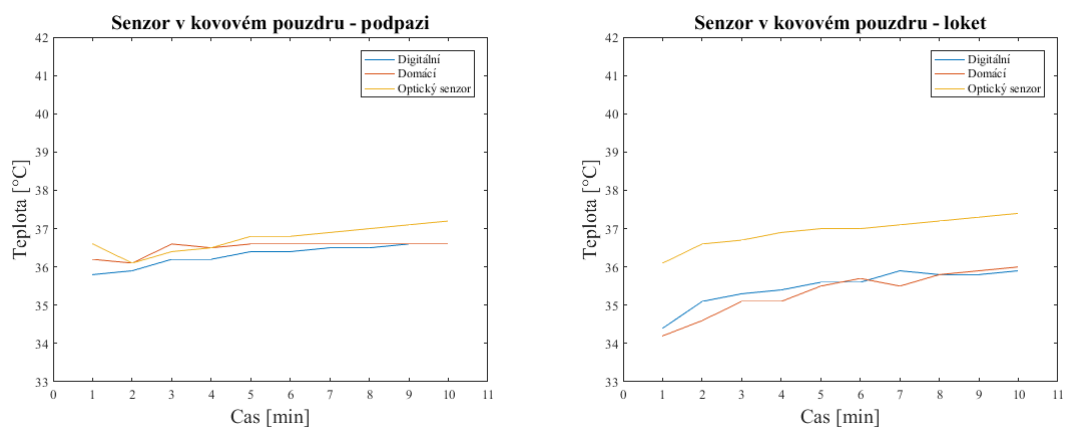
Obrázek 23: Naměřené hodnoty v podpaží a v lokti



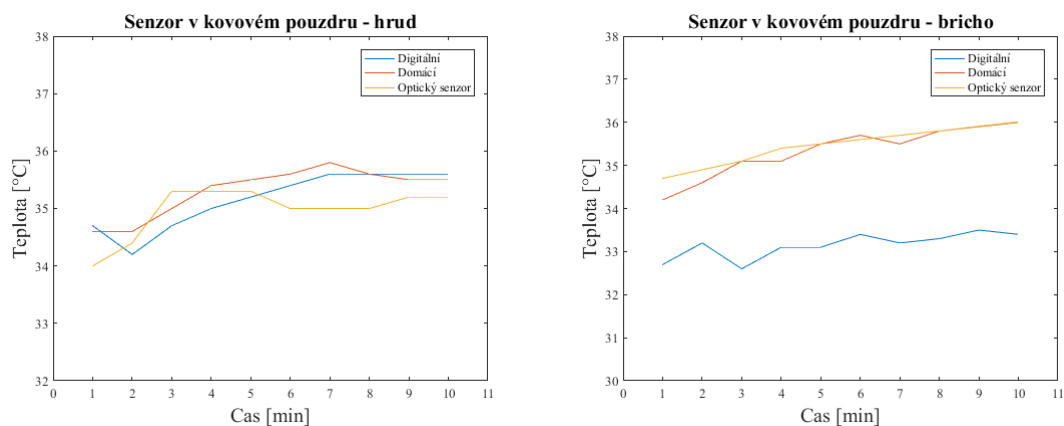
Obrázek 24: Naměřené hodnoty na hrudi a břiše

6.6.2 Dlouhodobé měření senzorem v kovovém pouzdře

Na následujících obrázcích jsou vyhodnoceny v grafech teploty těla měřené senzorem v kovovém pouzdře. Pro každou část těla (hrud, břicho, loket) byl vyhodnocen graf i s hodnotami referenčních teploměrů.



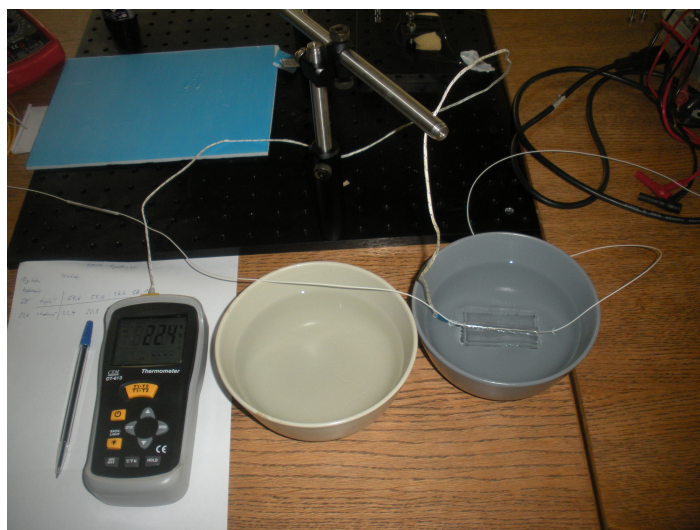
Obrázek 25: Naměřené hodnoty v podpaží a v lokti



Obrázek 26: Naměřené hodnoty na hrudi a břiše

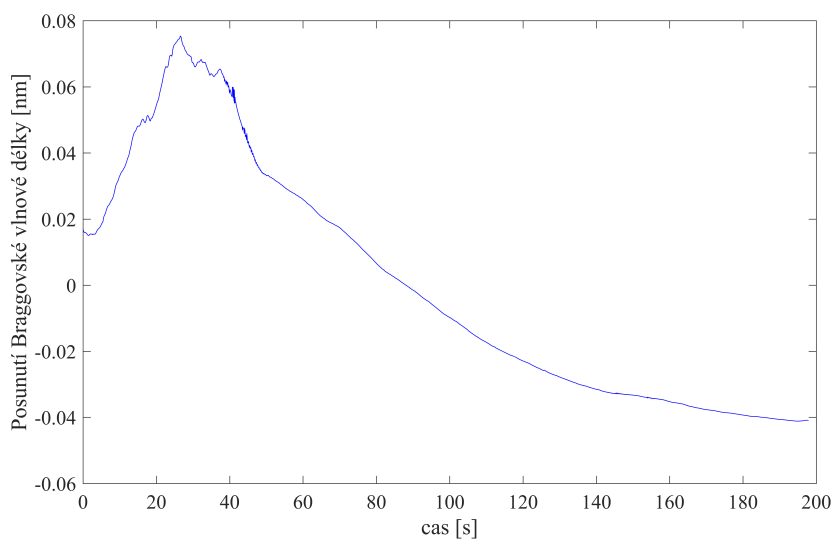
6.7 Měření hystereze

Jako poslední bylo provedeno měření hystereze, neboli časové prodlevy na změnu teploty. Realizované senzory se nejprve ponořily do nádoby s horkou vodou s teplotou a následně do nádoby se studenou vodou viz Obr 27.



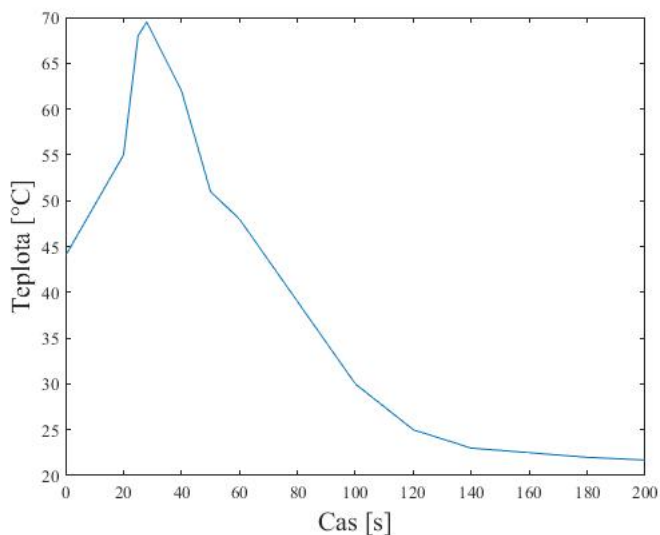
Obrázek 27: Ukázka měření hystereze

V následujícím obrázku 28 je zobrazena změna odražené Braggovské vlnové délky u senzoru s kovovým pouzdrem a jednotlivé děje měření hystereze.



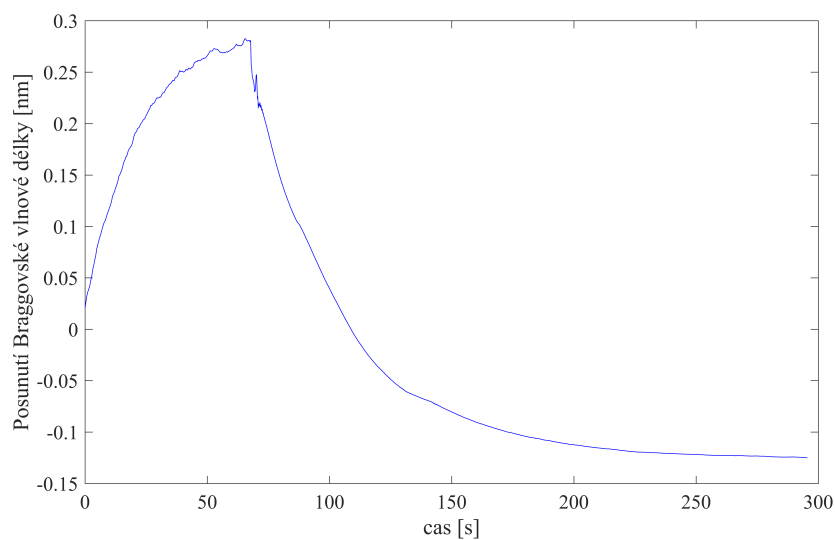
Obrázek 28: Graf posunutí vlnové délky při hysterezi u senzoru s kovovým pouzdrem

Po ponoření do horké vody o teplotě 70 °C senzor zaznamenal nárůst v odražené vlnové délce a po 20 vteřinách byl přesunut do studené vody o teplotě 21 °C. Po přesunutí je patrné sestupné snižování odražené vlnové délky od mřížky a senzor se postupně ochlazuje až na teplotu 21,7 °C po dobu přibližně tří minut viz Obr 29.



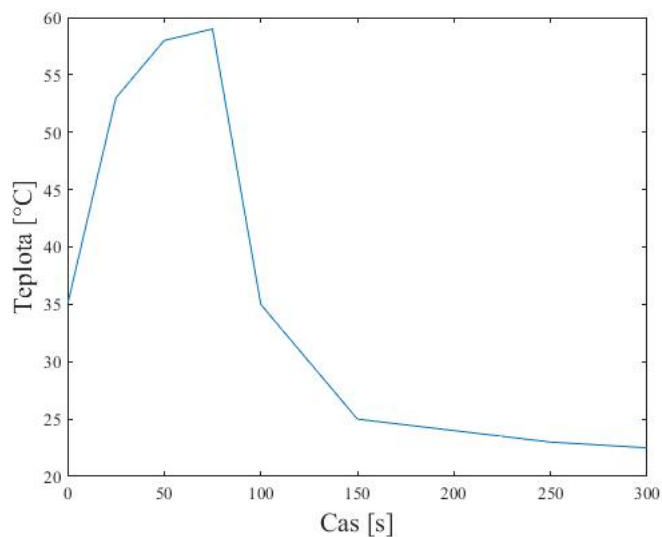
Obrázek 29: Graf teploty při hysterezi u senzoru s kovovým pouzdrem

Na obrázku 30 je zobrazena změna odražené vlnové délky a děje při měření se senzorem v PDMS.



Obrázek 30: Graf posunutí vlnové délky při hysterezi u senzoru v PDMS

Obdobně po ponoření senzoru v PDMS do horké vody o teplotě 60 °C senzor zaznamenal nárůst v odražené vlnové délce a po 30 vteřinách byl přesunut do studené vody o teplotě 22,4 °C. Sestupné snižování odražené vlnové délky od mřížky trvalo přibližně tři minuty a senzor se postupně ochladil až na teplotu 22,5 °C viz Obr 31.



Obrázek 31: Graf teploty při hysterezi u senzoru v PDMS

7 Závěr

První část mé bakalářské práce se věnuje popisu standardních, dnes nejrozšířenějších senzorů teploty. Popsal jsem jejich funkční principy, rozsahy a praktické využití. Dále jsem popsal senzory založené na snímání teploty za pomoci optického vlákna a na základě těchto znalostí jsem navrhl dvě implementace senzorů s Braggovskou mřížkou.

První z navržených implementací bylo vložení a zafixování Braggovské mřížky do kovového pouzdra ze slitiny mědi. Tím jsem dosáhl zamezení deformačním vlivům a s použitím materiálu s dobrou tepelnou vodivostí jsem dosáhl teplotního koeficientu $10,24 \text{ pm}/^\circ\text{C}$. Druhý implementovaný senzor se vložil do kovové nerezové trubice pro ochranu před nežádoucím vlivům deformace a následně zalil do elastomeru PDMS. Takto zapouzdrařený senzor dosáhl teplotního koeficientu $13,34 \text{ pm}/^\circ\text{C}$.

Pro ověření funkčnosti realizovaných senzorů jsem uskutečnil měření jak v teplotním boxu, tak i dlouhodobé měření teploty na lidském těle. Jako reference posloužil digitální teploměr CEM DTS-316 a klasický domácí teploměr. Naměřené teploty v teplotním boxu se u obou senzorů od referenčních lišili maximálně o $0,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Při měření lidské teploty na různých částech těla byly naměřené hodnoty srovnatelné s digitálním teploměrem CEM DTS-316 a přesnější než u klasického domácího teploměru. Z obou realizovaných senzorů se jako přesnější ukázal senzor zalitý v PDMS. Jako poslední bylo provedeno měření hystereze u obou senzorů.

Senzory s Braggovskou mřížkou mají jasnou budoucnost, ať už pro jejich malé rozměry, vysokou citlivost nebo imunitu vůči elektromagnetickým vlivům. S rostoucím vývojem techniky výroby mřížek a možností snadného aplikování pro měření teploty nebo mechanického namáhání se tyto senzory budou jistě nadále vyvíjet a zdokonalovat.

Literatura

- [1] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-145-4.
- [2] OTHONOS, Andreas. a Kyriacos. KALLI. *Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing.*, Boston, Mass.: Artech House, c1999. ISBN 0890063443.
- [3] LOWDER, T.L., K.H. SMITH, B.L. IPSON, A.R. HAWKINS, R.H. SELF-RIDGE a S.M. SCHULTZ. *High-temperature sensing using surface relief fiber Bragg gratings*. IEEE Photonics Technology Letters [online]. 2005, 17(9), 1926-1928 [cit. 2017-04-26]. DOI: 10.1109/LPT.2005.852646. ISSN 1041-1135. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1498905/>
- [4] SONG, Li-Jun a Guo-Qing YU. *The packaging technique about FBG temperature sensor*. In: 2010 Second International Conference on Communication Systems, Networks and Applications [online]. IEEE, 2010, s. 67-70 [cit. 2017-04-26]. DOI: 10.1109/ICCSNA.2010.5588773. ISBN 978-1-4244-7475-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5588773/>
- [5] YU, Qian, Yongjun ZHANG, Yi DONG, Yuan Ping LI, Cong WANG a Huacai CHEN. *Study on Optical Fiber Bragg Grating Temperature Sensors for Human Body Temperature Monitoring*. In: 2012 Symposium on Photonics and Optoelectronics [online]. IEEE, 2012, s. 1-4 [cit. 2017-04-26]. DOI: 10.1109/SOPO.2012.6271111. ISBN 978-1-4577-0911-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6271111/>
- [6] GIALLORENZI, T.G. *Optical fiber sensor technology*. In: 1985 International Electron Devices Meeting [online]. IRE, 1985, s. 116-116 [cit. 2017-04-26]. DOI: 10.1109/IEDM.1985.190906. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1485456/>